



TITLE:

Advanced Beam Forming by Synthesizing
Spherical Waves for Progressive Microwave
Power Transmission(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

Matsumuro, Takayuki

CITATION:

Matsumuro, Takayuki. Advanced Beam Forming by Synthesizing Spherical Waves for Progressive Microwave Power Transmission. 京都大学, 2017, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2017-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k20377>

RIGHT:

許諾条件により本文は2018-03-23に公開

京都大学	博士（工学）	氏名	松室 堯之
論文題目	Advanced Beam Forming by Synthesizing Spherical Waves for Progressive Microwave Power Transmission（先進的マイクロ波電力伝送に向けた球面波合成による高度ビーム形成）		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>本論文は、人体への影響や他の無線システムとの干渉を考慮した先進的マイクロ波電力伝送システムの実現を目的として、異なる次数の球面波を重ね合わせることでより所望のビームを合成する手法に関する研究成果について述べたものである。具体的には、(1)ユビキタス型マイクロ波電力伝送における受電アンテナの小型化と(2)ビーム型マイクロ波電力伝送におけるエネルギー低漏洩化という2つの課題に取り組んだ成果についてまとめており、全6章から構成されている。</p> <p>第1章は序論であり、本論文の研究背景として、人類の持続的発展に対するマイクロ波電力伝送および宇宙太陽発電システムの重要性が述べられている。さらに、地上におけるビーム型およびユビキタス型マイクロ波電力伝送の応用事例を紹介し、先進的マイクロ波電力伝送の実現に向けた課題と本論文の着眼点を明確にしている。</p> <p>第2章では、外向き球面波を複数合成することにより得られる、1点の多重極から放射する指向性を持った放射現象（合成球面波）の原理が明らかとなっている。開口面アンテナの理論によると、一定の電力密度における受電電力はアンテナの開口面積に比例する。一方で、数学的には無限に広がった平面波が球ベッセル関数で展開可能であることが知られている。本論文では原点の多重極から放射する球ハンケル放射波を合成することにより、角度方向におけるデルタ関数のフーリエ合成のように高い指向性が得られることが見出されている。この1点に集約した多重極からの放射現象は、開口面アンテナの理論（ホイヘンスの原理）では直接的に説明できないため、様々な角度からこの現象が解析されている。位置と運動量の不確定性関係から開口面アンテナの指向性を導き、角運動量と角度の不確定性関係から合成球面波が持つ指向性を導くことにより不確定性関係と指向性の対応性を明確にしている。また、球面波の原点近傍に存在する遮断領域が実効的波源となり有効開口面積を形成していることが示されている。これによって、合成球面波の指向性が開口面アンテナの理論と矛盾なく説明可能であることが述べられている。球形誘電体共振器が正確に球面波の境界条件を満たすことが明らかとなり、小型なハードウェアと高い指向性を合わせ持つアンテナが実現可能であることが示されている。</p> <p>第3章では、前章で得られた合成球面波の指向性を実現するため、同一の原点を持つ多層状の球形誘電体共振器を用いて、異なる次数の共振モードの固有値を励振周波数に縮退する手法が検討されている。多層球形誘電体共振器構造において、ひとつの球形誘電体共振器にひとつの次数の球面波に対応させている。このため、各次数の誘電体共振器において、TEモードとTMモードを縮退させることで、より様々な電磁界を表現することが出来ることが述べられている。具体的設計例によって、コア共振器では中心導体を用いて縮退させ、シェル共振器においてはスリット構造を用いて縮退させることが可能であることが示されている。さらに、試作した誘電体共振器の特性を評価するため、空洞球共振器を用いた測定装置を開発している。球対称性の高い空洞球共振器を用いることにより、共振モードに摂動を与えずに誘電体共振器の正確な放射パターンが得られることが示されている。得られた放射パターンから誘電体共振器の比誘電率の不均一性を測定する見通しが得られている。</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	松室 堯之
<p>第4章では、最適ビームを基準とした長距離マイクロ波電力伝送の効果的設計手法が述べられている。従来のビーム形成では、アレーアンテナの入力分布が第一に決定される。それに対して本論文では、アレーアンテナの設計に先立って真空中を伝搬するビーム形状を最適化する立場がとられている。同じ最大次数を持つ外向き合成球面波と内向き合成球面波を同振幅で合成することにより特異点を持たないビーム電磁界が得られることが示されている。このビーム電磁界の断面分布に比例した振幅分布および位相分布を送電アンテナ素子に入力（転写）することによりビームを形成している。合成係数を調整することでサイドローブを極小化した場合、ガウシアンビームとほぼ一致することが示されている。送受電距離に応じた最適なビームウェスト半径を求め、提案手法におけるエッジレベルの理論式を導出されている。また、提案手法を用いた場合のフェーズドアレーアンテナによる漏洩電力を計算し、転写によるビーム形成の有効範囲が評価されている。また、転写が有効に成り立つとき漏洩電力がエッジレベルによって直接評価可能であることが示されている。</p> <p>第5章では、地上マイクロ波電力伝送の信頼性向上のためビームパイロット信号を用いた単一周波数レトロディレクティブシステムが提案されている。このシステムにおいては、伝送路のマルチパスを避けるため、受電アンテナ面全体からビーム状のパイロット信号が放射される。また、屈折率の周波数依存性の影響を避けるため、パイロット信号とマイクロ波電力の伝搬には単一周波数で直交する偏波が適応される。本論文では、屈折率が波長に対して緩やかな空間分布を持つ場合でも、マイクロ波電力がパイロット信号とほとんど同一の空間を伝搬することがシミュレーションによって明らかにされている。また、直交する2つの偏波を独立に放射吸収するためのアレーアンテナ素子として、直交2重モード誘電体共振器アンテナが新たに提案されている。十字型半球状の誘電体共振器を用いることにより、直交するポート間で60 dBを超えるアイソレーションレベルが実験によって得られている。これにより、10 kmの長距離マイクロ波電力伝送システムにおける信頼性を保証する見通しが得られている。</p> <p>第6章は結論であり、本論文で得られた成果について要約されている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、人体への影響や他の無線システムとの干渉を考慮した先進的マイクロ波電力伝送システムの実現を目的として、異なる次数の球面波を重ね合わせることで所望のビームを合成する手法に関する研究成果についてまとめられている。本論文の主な成果は以下のとおりである。

1. 外向き球面波を複数合成することにより得られる、1点の多重極から放射する指向性を持った放射現象（合成球面波）を明らかにしている。角運動量と角度の不確定性関係から合成球面波が持つ指向性が導かれている。原点近傍に存在する次数に応じた大きさの遮断領域が本質的波源となり、有効開口面積を形成することが示されている。

2. 有限な大きさを持つ球形誘電体共振器が、正確な高次モード球面波の波源として動作することを明らかにしている。多層構造を持つ球形誘電体共振器により次数の異なる共振モードが縮退可能であること、および中心導体または異方性誘電率を持つ誘電体材料により TE モードと TM モードが縮退可能であることが示されている。また、球形誘電体共振器の比誘電率の不均一性を測定する見通しが得られている。

3. 球面波の合成電磁界を用いた低漏洩ビームの設計手法が確立されている。同じ最大次数を持つ外向き合成球面波と内向き合成球面波を同振幅で合成することにより特異点を持たないビーム電磁界が得られることが示されている。合成係数の調整によりサイドローブが極小化されることを明らかにしている。球面波により合成したビーム断面分布に比例した振幅分布および位相分布を送電アンテナ素子に入力することで設計通りのビームが得られる有効範囲が評価されている。

4. ビームパイロット信号を用いた単一周波数を持つレトロディレクティブシステムが提案されている。屈折率が空間分布を持つ場合にも、マイクロ波電力がパイロット信号とほとんど同一の空間を伝搬することがシミュレーションにより示されている。直交する2つの偏波を独立に放射吸収するためのアレーアンテナ素子として、直交2重モード誘電体共振器アンテナを開発し、高いアイソレーションレベルが得られている。

以上を要するに本論文は、新規原理に基づいた小型受電アンテナの基礎理論を構築し放射素子の基本構造を提案するものであり、新規方式による低漏洩ビーム型マイクロ波電力伝送システムの社会実装性向上の見通しを与えており、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成29年2月17日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。